

УДК 620.179.16: 620.179.17

САЛАМ БУССИ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**ПРАКТИЧНІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

Виконано аналіз інформаційних джерел, в яких наведені результати отримані за останні роки досліджень та розробок, направлених на створення нових ефективних електромагнітно-акустичних (ЕМА) перетворювачів (ЕМАП), призначених для вимірювань, контролю якості та діагностики матеріалів і виробів. Аналіз літературних джерел показав, що підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення величини індукції постійного поляризованого магнітного поля значно ускладнює сканування об'єкту контролю та веде до прискореного виходу з ладу ЕМА перетворювачів. Підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення потужності генераторів зондуючих імпульсів обмежено можливостями високочастотних котушок індуктивності ЕМА перетворювачів за причини їх пробой імпульсами високої напруги. Встановлена можливість суттєвого підвищення чутливості ЕМАП за рахунок використання імпульсних магнітних полів при умові виключення збудження когерентних і інших завад від ефекту Баркгаузена та магнітострикційного перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову. Використання імпульсних магнітних полів дозволяє виключити пошкодження ЕМА перетворювачів та зменшити їх стирання об поверхню об'єкту контролю.

Ключові слова: електромагнітно-акустичний перетворювач, ультразвукові хвилі, магнітне поле, джерело магнітного поля, об'єкт контролю, високочастотне електромагнітне поле, котушка індуктивності, контроль, вимірювання, діагностика

САЛАМ БУССИ, С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ**ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Выполнен анализ информационных источников, в которых приведены результаты полученных за последние годы исследований и разработок, направленных на создание новых эффективных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей (ЭМАП), предназначенных для измерений, контроля качества и диагностики материалов и изделий. Анализ литературных источников показал, что повышение чувствительности электромагнитно-акустического контроля за счет увеличения величины индукции постоянного поляризованного магнитного поля значительно усложняет сканирование объекта контроля и ведет к ускоренному выходу из строя ЭМА преобразователей. Повышение чувствительности электромагнитно-акустического контроля за счет увеличения мощности генераторов зондирующих импульсов ограничено возможностями высокочастотных катушек индуктивности ЭМА преобразователей по причине их пробой импульсами высокого напряжения. Установлена возможность существенного повышения чувствительности ЭМАП за счет использования импульсных магнитных полей при условии исключения возбуждения когерентных и других помех от эффекта Баркгаузена и магнитоstrictionного преобразования электромагнитной энергии в ультразвуковую. Использование импульсных магнитных полей позволяет исключить повреждение ЭМА преобразователей и уменьшить их стирание о поверхность объекта контроля.

Ключевые слова: электромагнитно-акустический преобразователь, ультразвуковые волны, магнитное поле, источник магнитного поля, объект контроля, высокочастотное электромагнитное поле, катушка индуктивности, контроль, измерение, диагностика

SALAM BUSSI, S. Yu. PLESNETSOV**PRACTICAL DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC CONVERTERS**

The analysis of information sources is carried out, in which the results of research and development obtained in recent years aimed at creating new effective electromagnetic-acoustic (EMA) transducers (EMAP) designed for measurements, quality control and diagnostics of materials and products are presented. Analysis of literature showed that increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic control by increasing the magnitude of the induction of a constant polarizing magnetic field greatly complicates the scanning of the test object and leads to an accelerated failure of the EMA converters. Increasing the sensitivity of electromagnetic-acoustic control by increasing the power of the probe pulse generators is limited by the capabilities of high-frequency inductors of the EMA transducers due to their breakdown by high voltage pulses. The possibility of a significant increase in the sensitivity of EMAT due to the use of pulsed magnetic fields has been established, provided that excitation of coherent and other interference from the Barkhausen effect and magnetostrictive conversion of electromagnetic energy into ultrasound are excluded. The use of pulsed magnetic fields eliminates damage to the EMA transducers and reduces their erasure on the surface of the control object.

Keywords: electromagnetic-acoustic transducer, ultrasonic waves, magnetic field, magnetic field source, control object, high-frequency electromagnetic field, inductor, control, measurement, diagnostics

Вступ. За останні роки опубліковано сотні робіт, присвячених дослідженням і розробкам електромагнітно-акустичних (ЕМА) перетворювачів (ЕМАП), найбільш важлива частина яких розглянута в статтях [1–2]. З аналізу цих робіт можна зробити наступні висновки щодо ЕМАП:

1. Основу ЕМА перетворювача складають три основні елементи: один або декілька джерел поляризованого магнітного поля, одно або декілька джерел електромагнітного поля (котушок індуктивності з струмом різного виду) і поверхневого шару або об'єму об'єкта контролю (ОК).

2. У багатьох випадках джерела поляризованого магнітного поля і котушки індуктивності ЕМАП мають індивідуальну конструкцію, що визначається головним чином геометричними параметрами ОК.

3. Принципову роль в роботі ЕМАП грають властивості поверхневого шару або об'єму матеріалу а також геометричні характеристики ОК.

Неоднозначність і неоднорідність властивостей матеріалу контрольованих виробів створюють істотні труднощі при конструюванні ЕМА перетворювачів.

На значні складності при конструюванні ЕМАП вказує Сазонов Ю.І., [3] оскільки, на його думку, одночасно необхідно враховувати «...проблеми радіофізики, фізичної та прикладної акустики, фізики твердого тіла, фізики магнітних явищ, теплофізики та молекулярної фізики», а також нетиповість електродинаміки взаємодії полів різного типу і структури з ОК. Істотні труднощі при створенні ЕМАП відзначили Чабанов В.Є. і Жуков В.А. [4]. Вони стверджують, що робота п'єзoeлектричних перетворювачів визначається всього 5–7 конструктивними параметрами, в той час як ефективність роботи ЕМАП залежить мінімум від 35 параметрів. З іншого боку Судакова К.В. і

Казюкевич І.Л. [5] практично показали, що за рахунок використання автоматичних ультразвукових установок з ЕМАП на ВАТ «Северсталь» отримані істотні економічні переваги, що стимулює подальші дослідження і розробки ЕМА перетворювачів.

Тому наявність ОК з різними властивостями, різноманітність конструкцій котушок індуктивності і систем, що намагнічують, потреба і можливість збудження і прийому різних типів хвиль і їх мод, зумовило розробку величезного числа модифікацій ЕМА перетворювачів і їх елементів.

Ще в 1975 р Аббакумов К.Є. [6] намагався розробити універсальні ЕМАП для збудження і прийому імпульсів ультразвукових коливань. Однак до теперішнього часу ця проблема не вирішена.

Метою роботи є аналіз нових інформаційних джерел і встановлення тенденцій вдосконалення і розробки нових типів ЕМА перетворювачів.

Сучасні ЕМА перетворювачі. Єрмолов І.М. в довіднику [7] вказав на недостатність розробок ЕМАП і спеціального обладнання для їх функціонування. В першу чергу це відноситься до елементів ЕМА перетворювачів. У роботах [8-10] авторами показано, що основну роль в перетворенні електромагнітної енергії в механічну (ультразвукову)

складності для формування максимальної індукції магнітного поля виникає для джерел магнітного поля (ІМП) портативних приладів. ІМП для ручних приладів ультразвукового контролю повинні задовольняти багатьом суперечливим вимогам. Вони повинні формувати магнітне поле з максимальною індукцією, тому що коефіцієнт подвійного ЕМА перетворення залежить від цього параметра квадратично [7]. З іншого боку, при контролі феромагнітних виробів, сила притискання ЕМАП до ОК повинна бути прийнятною з точки зору зусиль, які докладають оператори і, відповідно, забезпечення можливості сканування виробу. Слід враховувати необхідність контролю виробів з неелектропровідними неферомагнітними покриттями (наприклад, пофарбовані ОК) [10]. Тобто зміна величини індукції в залежності від відстані до поверхні металу повинно бути мінімальним. Відстань від торця полюса ІМП до котушки індуктора перетворювача має бути мінімальною, але при цьому в полюсі не повинні збуджуватися когерентні завади. Елементи конструкції ІМП не повинні формувати поле поза робочої зони ЕМАП. Габарити джерела МП повинні бути прийнятними з точки зору зручності використання дефектоскопістом при скануванні. Спрощені схеми деяких ІМП портативних ЕМАП

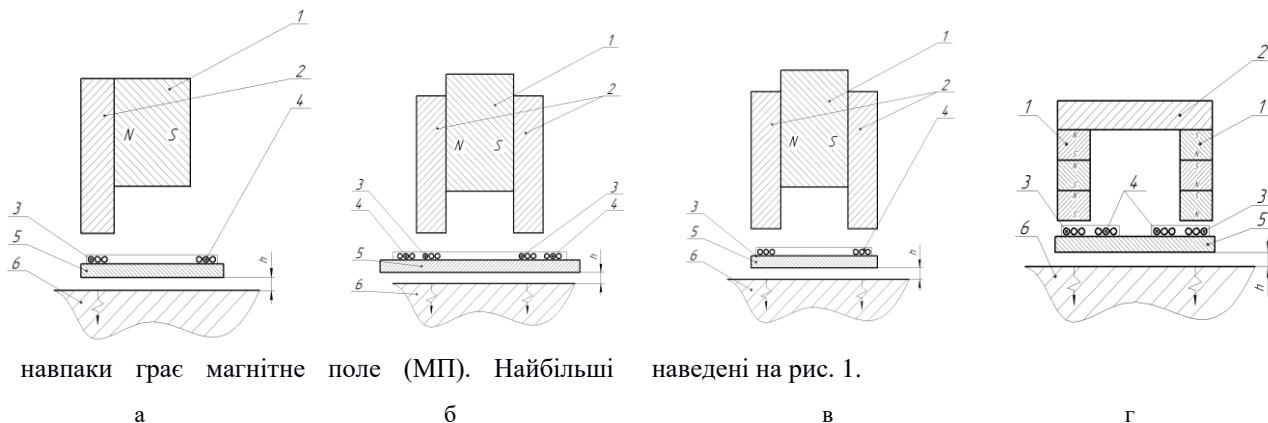


Рис. 1 – Схематичне зображення ІМП і їх розташування щодо котушок індуктивності ЕМАП [9]

На рис. 1а, б і г показано: 1 – магніти; 2 – магнітопроводи; 3 – робочі ділянки високочастотних котушок; 4 – неробочі ділянки високочастотних котушок; 5 – протектор; 6 – ОК, h – повітряний прошарок між ЕМАП і поверхнею ОК.

На рис. 1б: 3 і 4 – робочі ділянки високочастотної котушки, використовуваної для синфазного випромінювання і прийому.

На рис. 1а і в наведені варіанти схем для суміщених ЕМАП, що збуджують і приймають зсувні коливання нормально поверхні ОК.

На рис. 1б і г наведені варіанти виконання роздільно-суміщеного ЕМАП.

На рис. 1г наведено варіант ІМП, призначений для одночасного формування нормального і тангенціального магнітних полів із застосуванням постійних магнітів і магнітопроводів. Перевагою такого пристрою є мінімальне розсіювання МП. Недоліком є суттєва сила притискання ЕМАП до ОК з феромагнітного матеріалу.

Складною проблемою при конструюванні ЕМАП є створення МП заданої спрямованості поза габаритами ІМП, часто на досить значній відстані. Особливо це важливо при контролі неферомагнітних матеріалів. В цьому випадку значних величин індукції МП можна досягти при використанні принципу витіснення магнітного поля. Варіанти конструкцій таких ІМП з елементами ЕМАП показані на рис. 2.

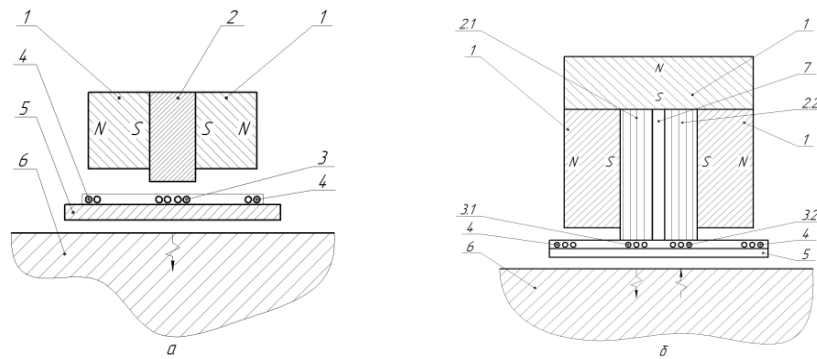


Рис. 2 – Схематичне зображення ІМП і їх розташування відносно котушок індуктивності ЕМАП при використанні способу витіснення магнітного поля в поверхневий шар ОК [9]

На рис. 2 показано: 1 – магніти; 2, 2.1, 2.2 – магнітопроводи; 3, 3.1, 3.2 – робочі ділянки збуджуючої і приймальної високочастотних котушок; 4 – неробочі ділянки збуджуючої і приймальних високочастотних котушок; 5 – протектор; 6 – ОК, 7 – акустичний екран.

Розглянемо побудову прямого роздільно – суміщеного ЕМАП зсувних хвиль із застосуванням варіанту, приведенного на рис. 2б. В цьому випадку МП залишається єдиний вихід – в напрямку збуджуючої 3.1 і приймальної 3.2 ділянок котушок індуктивності і шару металу ОК під ними.

Магнітопровід перетворювача виготовляється шихтованим з тонких пластин трансформаторної сталі розділений навпіл акустичним екраном 7.

При такій конструкції, навіть якщо імпульси когерентних завад збудяться в частині магнітопроводу 2.1, наявних над робочою збуджуючою ділянкою 3.1 високочастотної (ВЧ) котушки, вони не перейдуть в частину магнітопроводу 2.2 і не будуть зареєстровані робочою ділянкою 3.2 приймальної ВЧ котушки індуктора перетворювача. Величина когерентних завад за рахунок ефекту Баркгаузена та магнітострикційного перетворення буде мінімальною.

Виготовлений ІМП являє собою замкнуту трубчасту конструкцію прямокутної форми з магнітів товщиною 5 мм і загальною висотою 24 мм. Магніти фіксувалися по периметру окантовкою з алюмінію завтовшки 3,5 мм. З метою усунення частини когерентних завад, місця з'єднань магнітів між собою не склеювалися. Внутрішній розмір порожнини ІМП 6,5x15x24 мм³. Вона була заповнена пластинами з трансформаторної сталі товщиною 0,5 мм. Для такої конструкції ІМП величина нормальної компоненти індукції магнітного поля при мінімальному зазорі 1 мм між високочастотної котушкою і ОК досягала 1,2 Тл [9].

Цілий ряд публікацій і патентів присвячені конструкціям, в основному, накладних ЕМАП, які розроблені співробітниками МНВО «СПЕКТР»: Алексіним С.Г., Бобровим В.Т., Бобровим СВ, Козловим В.Н., Сергєєвим К.Л. та ін. [11–15]. Технічний результат від цих розробок – можливість визначення текстурної анізотропії, товщини і напружено-деформованого стану конструкцій і прокату типу стрічок, смуг, труб тощо.

Група дослідників з Іжевська: Муравйов В.В., Муравйова О.В., Кокоріна Е.Н., Балобанов Е.Н. та ін. [16–19] розглянули питання формування магнітного поля підмагнічування П-подібного пристрою для прохідних ІМП і накладних джерел МП на основі постійних магнітів. При цьому стверджується, що вдалося отримати МП з індукцією до 2,7 Тл. Проведена оптимізація систем підмагнічування прохідних електромагнітно-акустичних перетворювачів об'ємних хвиль для неруйнівного контролю пруткового прокату.

Для збудження і реєстрації горизонтально поляризованих хвиль, як правило, використовують ІМП з періодичною структурою магнітів [7, 9, 20–21], рис. 3. На рис. 3 показано: 1 – ОК; 2 – магніти; 3 – провідники зі струмом; 2а – крок періодичної структури магнітів, рівний довжині порушуємо ультразвукової хвилі. Недоліками такої конструкції є значне зусилля притискання до феромагнітних ОК і сильна залежність інформаційного сигналу від зміни зазору між ОК і ЕМАП.

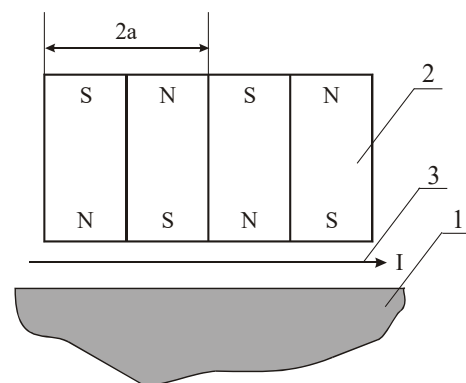


Рис. 3 – Схема збудження поверхневих хвиль або хвиль Лемба SH типу [9]

Найчастіше в установках для автоматичного контролю застосовують електромагніти значних габаритів [22] з індукцією магнітного поля, що досягає 1 Тл і більше для зазорів до 5,0 мм. При використанні постійних магнітів і електромагнітів під час контролю феромагнітних виробів виникають великі сили притягування. Для полегшення і мобільності сканування поверхні ОК застосовують ЕМАП розміщені на різних механічних пристроях [9, 22], що стежать за поверхнею ОК.

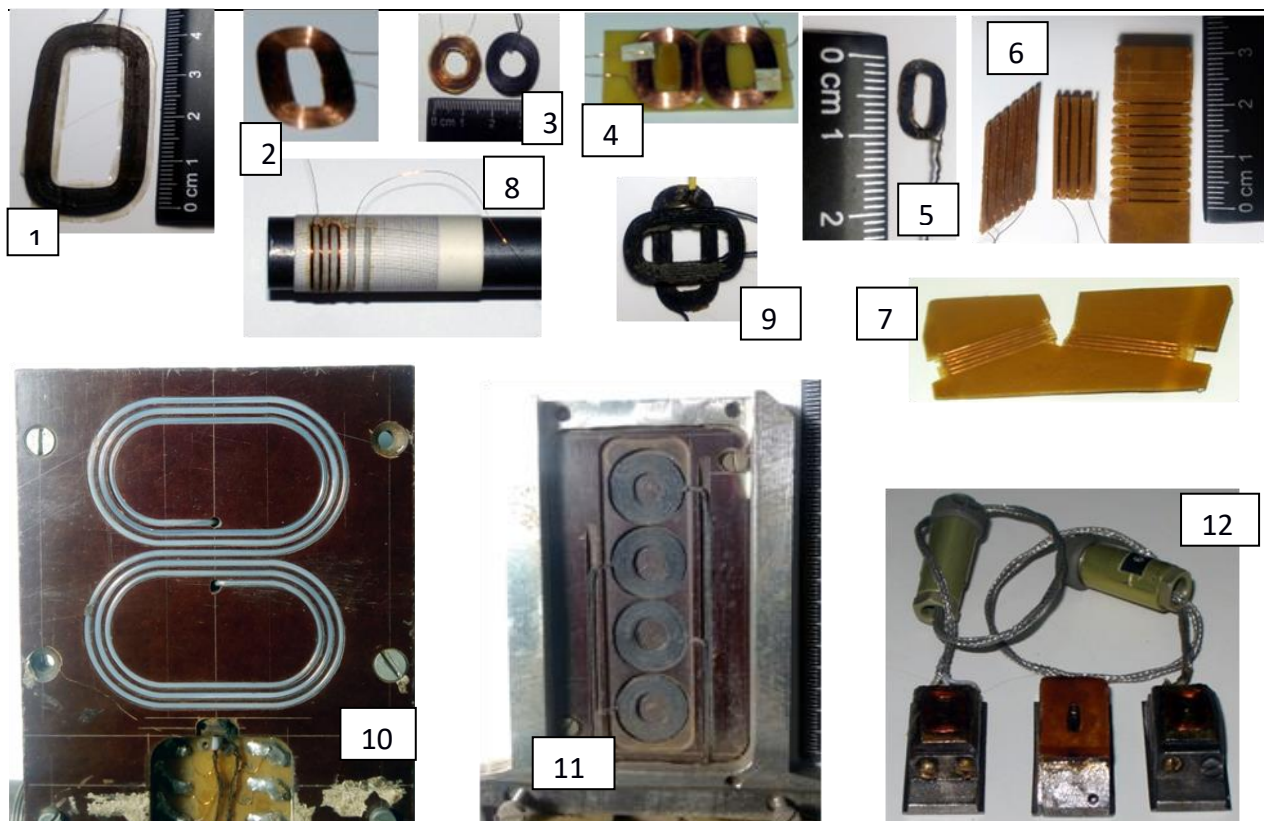


Рис.4 – ВЧ котушки індуктивності ЕМАП різного призначення [2, 9–10, 22]

З викладеного випливає необхідність оптимізації намагнічуючих систем ЕМАП для кожного конкретного випадку, що істотно ускладнює і здорожує процес розробки систем контролю і діагностики з використанням ЕМА способу збудження і прийому ультразвукових коливань.

Високочастотні котушки індуктивності ЕМАП також мають значну різноманітність конструкцій, рис.4. Їх застосовують в суміщеному, роздільно-суміщеному і в роздільному варіантах, накладні і прохідні. Вони бувають одновиткові і багатовиткові, одношарові і багатшарові. Ділянки ВЧ котушок використовують в синфазному і протишазному включенні або комбінованому, в залежності від орієнтації вектору індукції поляризованості магнітного поля. Котушки індуктивності мають різну форму: з прямолінійними і вигнутими провідниками, спіральні, еліптичні, у вигляді крил метелика, звивисті – з прямолінійними і криволінійними ділянками. Деякі види поширених ВЧ котушок ЕМАП наведені на рис. 4.

На рис. 4 показано: 1 – плоска одношарова котушка суміщеного широкозахватного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК в синфазному або протишазному включенні (визначається полярністю МП над лінійними ділянками котушки); 2 – плоска одношарова котушка суміщеного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК в синфазному або протишазному

включенні (визначається полярністю МП над лінійними ділянками котушки); 3 – плоскі одношарові котушки суміщених ЕМАП для збудження і прийому ультразвукових коливань з круговою поляризацією нормально поверхні ОК; 4 – плоскі одношарові котушки окремо – суміщеного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК; 5 – плоска одношарова міні-котушка суміщеного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК в синфазному або протишазному включенні (визначається полярністю МП над лінійними ділянками котушки); 6 – плоскі високочастотні котушки суміщених ЕМАП, кожна секція яких намотана декількома витками, для збудження і прийому хвиль Релея, Лемба, або під кутом до поверхні ОК, в залежності від частоти струму живлення; 7 – плоскі високочастотні котушки роздільно-суміщеного ЕМАП, кожна секція яких намотана декількома витками, для збудження і прийому хвиль Релея або Лемба; 8 – високочастотна котушка суміщеного ЕМАП, кожна секція якої намотана декількома витками, для збудження і прийому хвиль Релея або під кутом до поверхні ОК або крутильних хвиль, в залежності від частоти струму живлення (для стрижнів і труб малого діаметра); 9 – плоскі високочастотні котушки роздільно-суміщеного ЕМАП, для збудження і прийому нормально до поверхні ОК зсувних хвиль з обертовим вектором поляризації (котушки живлять

високочастотними струмами, зсунутими по фазі один від одного на 90°), розроблено Неволіним О.В. [20]; 10 – плоска високочастотна котушка, намотана багатожильним дротом, поєднаного ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань нормально поверхні ОК (використовується з 1983 р в установках автоматичного ультразвукового контролю рейок [22] і в портативному товщиномірі [10]); 11 – плоскі високочастотні котушки ЕМАП, намотані багатожильним проводом, для збудження і прийому зсувних ультразвукових коливань з круговою поляризацією нормально поверхні ОК (використані в 4-х каналній установці ультразвукового контролю залізничних коліс); 12 – плоскі одношарові котушки з полюсними наконечниками суміщених ЕМАП для збудження і прийому лінійно поляризованих ультразвукових коливань в 4-х каналному автоматичному товщиномірі для безшовних труб [22]. З викладеного випливає, що різноманіття конструкцій ВЧ котушок індуктивності ЕМАП також вимагає індивідуального підходу до виконання конкретних технічних завдань вимірів, контролю і діагностики у відношенні до окремого ОК, що, з одного боку, ускладнює процес їх розробки, а з іншого – дозволяє вирішувати задачу з високою ефективністю.

Слід зазначити, що істотних зрушень в розробці ЕМАП для збудження і прийому хвиль Релея і Лемба не відбулося. У більшості випадків в ЕМАП, використовуваних для діагностики, застосовуються традиційні високочастотні котушки, рис.4.6–4.7, типу «меандр» [2, 9, 23]. Це говорить про вдале науково-технічне рішення, яке дає можливість реалізувати багато технічних і практичних завдань – контролювати вироби з великими площами: листи, труби різного діаметру, ємності тощо. Недоліком таких перетворювачів є необхідність у виготовленні набору перетворювачів налаштованих на одну конкретну частоту ультразвукових коливань. Наприклад в роботі [23] для досліджень алюмінієвої пластини товщиною 5 мм хвилями Лемба застосували дванадцять різних ЕМАП.

Помітного практичного застосування ЕМАП для збудження і прийому ультразвукових хвиль Релея і Лемба типу SH мегагерцового діапазону в літературі не виявлено. Хоча дослідження в цій області тривають. Швидше за все, це пов'язано зі складною структурою системи намагнічування таких перетворювачів [2, 7] і надзвичайно сильним впливом зміни величини зазору на чутливість контролю.

Успішно тривають розробки ЕМАП з введенням ультразвукових імпульсів в обсяг ОК під кутом. Мишкін А.В. [24] досліджував діаграми спрямованості похилих перетворювачів і показав, що на рівень бічних пелюсток істотно впливає ширина елемента високочастотної котушки і величина зазору між ЕМАП і ОК. Він зробив висновок, що слід шукати компроміс між досягненням необхідної чутливості і необхідною формою діаграми спрямованості.

Подальше просування в розробках похилих ЕМАП знайшло свій розвиток у створенні фазованих решіток. Мишкін А.В. [24] розвинув підхід з моделювання ультразвукових полів багатоеlementних ЕМАП на базі рішень для засереджених джерел випромінювання. При цьому враховані як електродинамічний так і магнітострикційні механізми ЕМА перетворення, які визначають діаграми спрямованості ЕМАП.

ЕМА перетворювачі також використовуються для прийому ультразвукових імпульсів, збуджених іншими джерелами, наприклад за рахунок акустичної емісії. Ряд авторів запропонували використовувати ЕМАП для реєстрації коротких ультразвукових імпульсів збуджених в металі ємнісними перетворювачами [25] або лазером [26] при виконанні високоточних вимірювань фізико-механічних характеристик матеріалів ОК.

Помітні досягнення відбулися в області розробки ЕМАП для товщинометрії феромагнітних металовиробів з діелектричними покриттями [10, 27], в якому за рахунок використання ВЧ котушки в формі «крил метелика», рис.5, і складеного подовженого постійного магніту вдалося збільшити робочий зазор (товщину діелектричного покриття) між перетворювачем і поверхнею металу до 10 мм. На рис. 5 наведено схему розробленого перетворювача.

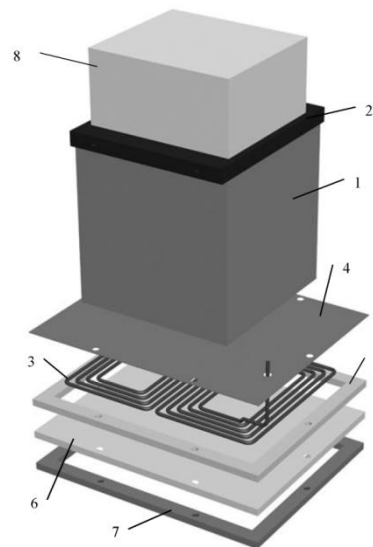


Рис. 5 – Конструкція ЕМАП для контролю ОК з діелектричним покриттям товщиною до 10 мм [27]

Корпус перетворювача є розбірним (на рисунку не показаний). Потужний постійний магніт 1 на основі кераміки NeFeB для підвищення індукції поляризуючого магнітного поля в поверхні виробу фіксується за допомогою феромагнітної пластини-магнітопроводу 2. Магніт 1 відділяється від ВЧ котушки 3 екрануючою пластиною 4, виконаної, наприклад, з латуні типу ЛС69 товщиною 0,2 мм. Вона необхідна для виключення збудження ультразвукових імпульсів когерентних завад в об'ємі магніту 1. Джгут провідників котушки 3 поміщається в окантовку 5 з діелектрика, наприклад

склотекстоліту. Окантовка 5 з'єднується з протектором 6 з склотекстоліту, після чого котушка 3 заливається клеєм – це запобігає її пошкодженню через механічні мікрозміщення, що виникають під час роботи. На протекторі 6 закріплюється фіксує окантовка 7 з латуні. Розроблений резонансний ЕМАП був виготовлений і випробуваний на катанях і безперервно вилитих зразках з феромагнітних сталей товщиною до 100 мм. Діелектричне покриття імітували прокладками з склотекстоліту. Живлення ЕМА перетворювача здійснювалося генератором [28], який формував у індукторі височастотні пакетні імпульси струму величиною до 60 А. Напруга на індукторі досягала 3 кВ (при зазорі 10 мм).

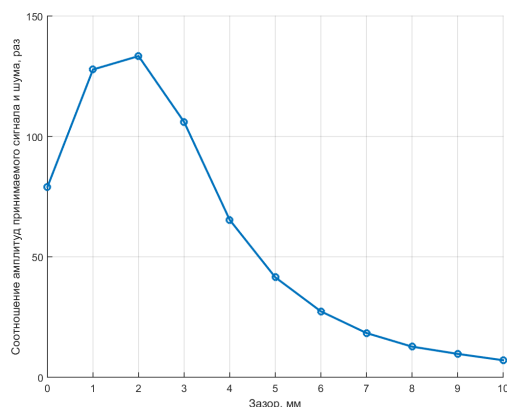


Рис. 6 – Залежність корисного сигналу ЕМАП від товщини діелектричного покриття [27]

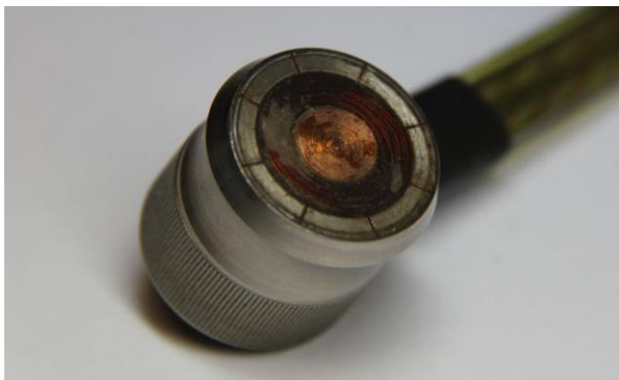


Рис. 7 – ЕМАП з імпульсним ІМП [11]

Тривалість зондувальних імпульсів регулювали в межах 1...10 періодів частоти заповнення в пакеті. Індукція поляризованого магнітного поля при зазорі 10 мм досягала 0,6 Тл. Досліджено діапазон ультразвукових частот в межах 1,5...2,5 МГц. Налаштування резонансної частоти ЕМАП здійснювали при зазорі 2 мм, що дозволяло отримати відносно невеликі зміни амплітуд прийнятого корисного сигналу і шуму при зміні товщини покриття на ± 1 мм, що є важливим при автоматичному контролі з заданим повітряним зазором між перетворювачем і металом. Типова залежність амплітуди донного сигналу від товщини покриття наведена на рис. 6.

Аналіз дослідженої залежності показав, що при зазорі 10 мм з прозорих з точки зору акустики металів, без застосування методів обробки інформації, співвідношення амплітуд корисного сигналу і шуму досягає 7 разів, що цілком достатньо для товщинометрії.

Проте, незважаючи на високу чутливість контролю, цей перетворювач сильно притискається до поверхні ОК, що приводить до стирання протектора. Окрім того, ручне сканування виробу практично неможливе.

Ряд дослідників [4, 11, 21, 29-30] пропонують виключити недолік ЕМАП, пов'язаний з необхідністю використання значних величин індукції поляризованого магнітного поля шляхом використання імпульсного магнітного поля. Поляризоване магнітне поле ІМП створюється прямокутним імпульсом струму заданої тривалості, пропущеним через котушки індуктивності різних конструкцій, що в більшості випадків містять сердечник. Автори стверджують, що можна сформувати МП з індукцією, що перевищує в кілька разів поля, отримані за допомогою постійних магнітів. Крім того, автори роботи [21] стверджують, що при імпульсному підмагнічуванні виконання височастотної котушки двошаровою дозволяє збільшити інформаційний сигнал в 2,3 рази.

У дисертаційній роботі Альохіна С.Г. [11] (2013) надано детальну інформацію про розроблений ЕМАП, рис. 7, з імпульсним джерелом магнітного поля. ІМП виконаний з броньованим розрізним осердям 2, в якому розміщена котушка індуктивності 1, рис. 8 (3 – ОК). Оскільки індуктивність такого джерела виявилася значною, то тривалість імпульсу струму, який живить ЕМАП досягала 1 мс, що є суттєвим недоліком. Очевидно, що тривалість імпульсу живлення перетворювача необхідно скорочувати.

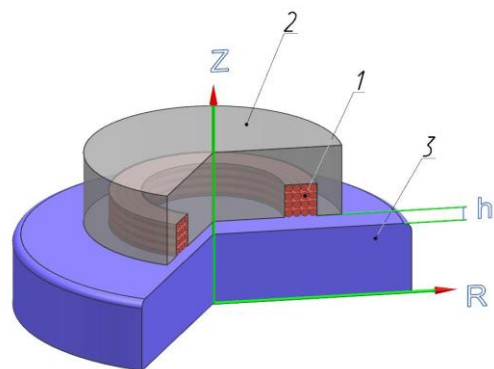


Рис. 8 – Схема імпульсного ІМП [11]

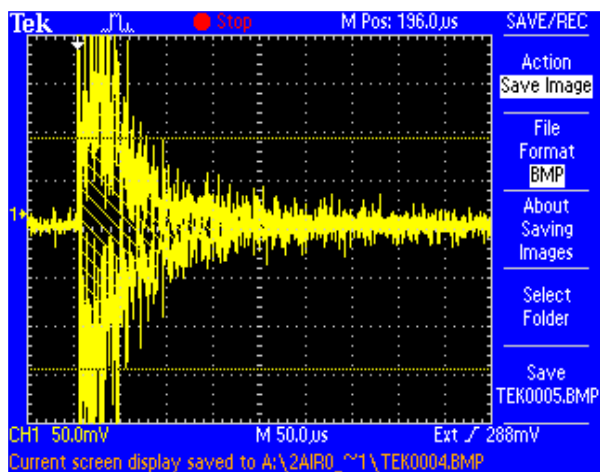


Рис. 9 – Перешкоди Баркгаузена, які обумовлені дією переднього фронту імпульсу живлення ІМП [11]

Крім того, наявність броньованого сердечника призвело до збудження шумів Баркгаузена значною амплітуди і тривалості, рис. 9, що помітно знижує ефективність роботи ЕМАП з імпульсним ІМП такої конструкції. З викладеного випливає перспективність застосування імпульсних ІМП з мінімальною індуктивністю його котушки і мінімальним обсягом феромагнітного сердечника або без сердечника.

Висновки

1. Аналіз літературних джерел показав, що підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення величини індукції постійного поляризуючого магнітного поля значно ускладнює сканування об'єкту контролю та веде до прискореного виходу з ладу ЕМА перетворювачів.

2. Підвищення чутливості електромагнітно-акустичного контролю за рахунок збільшення потужності генераторів зондуєчих імпульсів обмежено можливостями височастотних котушок індуктивності ЕМА перетворювачів за причини їх пробою імпульсами високої напруги.

3. Встановлена можливість суттєвого підвищення чутливості ЕМАП за рахунок використання імпульсних магнітних полів при умові виключення збудження когерентних і інших завад від ефекту Баркгаузена та магнітострикційного перетворення електромагнітної енергії в ультразвукову.

4. Використання імпульсних магнітних полів дозволяє виключити пошкодження ЕМА перетворювачів та зменшити їх стирання об поверхню об'єкту контролю.

Список літератури

1. Плеснецов С. Ю., Сучков Г. М., Корж А. И., Суворова М. Д. Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2018. – №2. – С. 24–31.
2. Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю., Мещеряков С. Ю., Юданова Н. Н. Новые разработки электромагнитно-акустических преобразователей. (обзор) // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2018. – №3. – С. 27–34.
3. Сазонов Ю. И. (2014) Электромагнитно-акустические эффекты

в конденсированных средах и физические методы их использования. XXVII сессия Российского акустического общества, посв. памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А. В. Смолякова и В. И. Попкова. С.-Петербург, 16–18 апреля 2014.

4. Чабанов В. Е., Жуков В. А. (2013) Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей. В мире неразрушающего контроля, 1, 36–43.
5. Судакова К. В., Казюкевич И. Л. О повышении эффективности контроля качества металлургической продукции // В мире неразрушающего контроля. № 3. С. 8–10.
6. Аббакумов К. Е. К вопросу об оптимизации параметров электромагнитно-акустических излучателей и приемников // Известия ЛЭТИ. – 1975. – № 168. – С. 19–26.
7. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
8. Петрищев О. Н., Сучков Г. М., Плеснецов С. Ю. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 1. Теоретические основы расчета и проектирования электроакустических преобразователей электромагнитного типа: монография. – Харьков: Издательство «Оберіг». – 2019 – 556 с.
9. Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Десятниченко А. В. Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий: монография. Харьков: ТОВ «Планета-принт», 2016 – 230 с.
10. Десятниченко О. В. Электромагнитно-акустичний товщинімір для контролю металовиробів з діелектричними покриттями. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Харьков: «Моделіст», 2015 – 20 с.
11. Альохін С. Г. Товщинометрія металокопункцій на основі електромагнітно-акустичного перетворення в імпульсному магнітному полі: канд. дис.-М.: МНВО «Спектр», 2013. 95 с.
12. Самокрутов А. А., Шевалдыкин В. Г., Бобров В. Т., Сергеев К. Л., Алехин С. Г. «Электромагнитно-акустический преобразователь». Патент РФ на изобретение №2343475 Бюл. изобр. – 2009. – №1.
13. Самокрутов А. А., Бобров В. Т., Шевалдыкин В. Г., Сергеев К. Л., Козлов В. Н., Алехин С. Г. «Магнитная система электромагнитно-акустического преобразователя». Патент РФ на изобретение №2350943 Бюл. изобр., 2009, №9.
14. Электромагнитно-акустический преобразователь. Самокрутов А. А., Бобров В. Т., Шевалдыкин В. Г., Алехин С. Г., Козлов В. Н. Патент на изобретение RUS 2334981 20.02.2007.
15. Алехин С. Г., Самокрутов А. А., Бобров В. Т., Бобров С. В., Сергеев К. Л. Моделирование магнитных систем ЭМА-преобразователей для возбуждения ультразвуковых волн. Контроль. Диагностика. – 2013. – №7 – С. 12–18.
16. Муравьев В. В. К расчету параметров магнитной системы электромагнитно-акустического преобразователя / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Е. Н. Балобанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 197–205.
17. Электромагнитно-акустический преобразователь. Патент РФ на полезную модель №134658 от 31.05.2013. / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Прякин, Е. Н. Балобанов; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32.
18. Электромагнитно-акустический преобразователь. Патент РФ на полезную модель №127931 от 23.11.2012. / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Прякин, Е. Н. Балобанов, Л. В. Волкова; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 6 с.
19. Муравьева О. В. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина, В. Д. Стерхов, Д. В. Малютин // Датчики и системы. 2013. – №2. – С. 2–9.
20. Астаф'єв А. Н., Неволін О. В., Мамай А. М., Мутяченко О. В., Астаф'єв Н. А., Неволін В. О. Універсальна приставка для стандартних ультразвукових дефектоскопів і товщинімірів // дефектоскопії. 2006. – №7. – С. 73–82.

21. Ohtsuka Y., Yoshimura T., Ueda Y. P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. Pages: 1609 – 1612, DOI: 10.1109 / ULTSYM.2007.405.
 22. Сучков Г. М., Алексеев Е. А., Захаренко В. В. Енерго- і ресурсозберігаючі прилади та технології неруйнівного контролю // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. 2006. – №4. – С. 29–34.
 23. WilcoxPD; M. Lowe JS; Cawley P. The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. Year: 2005, Volume: 52, Issue: 12. IEEE Journals & Magazines. Pages: 2370 – 2383, DOI: 10.1109 / TUFFC.2005.1563281.
 24. Мишкін А. В. Вплив конструктивних параметрів багатоселементних фазованих перетворювачів на формування акустичних полів: Автореф. канд. дис. Іжевськ: ІжГТУ, 2015. – 22 с.
 25. Мигачев С. А., Куркин М. И., Смородинский Я. Г. Безконтактное возбуждение звука в металле видеоимпульсами электрического поля // Дефектоскопия. – 2016. – №. 11. – С. 48–53.
 26. Gurevich, S.Yu., Petrov, Yu.V., Shusharin, AV, Golubev, EV. Analysis of ultrasonic waves excited in a metal plate by nanosecond laser pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. №45 (4), P. 247–251.
 27. Мігущенко Р. П., Сучков Г. М., Радев Х. К., Петрищев О. Н., Десятніченко А. В. Електромагнітно-акустичний перетворювач для ультразвукової товщинометрії феромагнітних металовиробів без видалення діелектричного покриття // Технічна електродінаміка. – 2016. – №2 – С. 78–82.
 28. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev ON, Mygushchenko RP, Suchkov GM, Sotnik SV, Kropachek O.Yu. Powerful sources of pulse high-frequency electromechanical transducers for measurement, testing and diagnostics // Електротехніка і електромеханіка. 2018. – №2. – С. 31–35.
 29. Подолян А. А. Формирование магнитного поля с заданными характеристиками в ЭМА преобразователях систем неразрушающего контроля промышленного оборудования // Методы и приборы контроля качества. – 2006. – Вып. 17. – С. 18–21.
 30. Тымчик Г. С. Формирование импульсов специальной формы для электромагнитных акустических преобразователей / Г.С. Тымчик, А.А. Подолян// Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Приборостроение». – 2013. – Вып. 45. – С. 64–69.
- References (transliterated)**
1. Plesnecov S. Yu., Suchkov G. M., Korzh A. I., Suvorova M. D. Novye teoreticheskie issledovaniya i razrabotki v oblasti elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovaniya (obzor) // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij kontrol. – 2018. – No2. – P. 24–31.
 2. Suchkov G. M., Plesnecov S. Yu., Mesheryakov S. Yu., Yudanov N. N. Novye razrabotki elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej. (obzor) // Tehnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij kontrol. – 2018. – No3. – P. 27–34.
 3. Sazonov Yu. I. (2014) Elektromagnitno-akusticheskie efekty v kondensirovannyh sredah i fizicheskie metody ih ispolzovaniya. XXVII sessiya Rossijskogo akusticheskogo obshchestva, posv. pamyati uchenyh-akustikov FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr» A. V. Smolyakova i V. I. Popkova. S.-Peterburg, 16–18 aprelya 2014.
 4. Chabanov V. E., Zhukov V. A. (2013) Osobennosti ultrazvukovogo kontrolya s primeneniem elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej. V mire nerazrushayushego kontrolya, 1, 36–43.
 5. Sudakova K.V., Kazyukevich I.L. O povyshenii effektivnosti kontrolya kachestva metallurgicheskoy produkcii // V mire nerazrushayushego kontrolya. No 3. P. 8–10.
 6. Abbakumov K.E. K voprosu ob optimizacii parametrov elektromagnitno-akusticheskikh izluchatelej i priemnikov // Izvestiya LETI. – 1975. – No 168. – P. 19–26.
 7. Nerazrushayushij kontrol: Spravochnik: V 7 t. Pod obsh. red. V. V. Klyueva. T.3: Ultrazvukovoj kontrol / I. N. Ermolov, Yu. V. Lange. – .Moscow: Mashinostroenie, 2004. – 864 p.
 8. Petrishev O. N., Suchkov G. M., Plesnecov S. Yu. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 1. Teoreticheskie osnovy rascheta i proektirovaniya elektroakusticheskikh preobrazovatelej elektromagnitnogo tipa: monografiya. – Kharkiv: Vidavnistvo «Oberig». – 2019 – 556 p.
 9. Migushenko R. P., Suchkov G. M., Petrishev O. N., Desyatnichenko A. V. Teoriya i praktika elektromagnitno-akusticheskogo kontrolya. Chast 5. Osobennosti konstruirovaniya i prakticheskogo primeneniya EMA ustrojstv ultrazvukovogo kontrolya metalloizdelij: monografiya. Kharkiv: TOV «Planeta-print», 2016 – 230 p.
 10. Desyatnichenko O. V. Elektromagnitno-akustichna tovshinometriya dlya kontrolyu metalovirobiv z dielektrichnimi pokrittyami. Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. – Kharkiv: «Modelist», 2015 – 20 p.
 11. Alohin S. G. Tovshinometriya metalokonstrukcij na osnovi elektromagnitnoyi-akustichnogo peretvorenniya v impulsnomu magnitnomu poli: kand. dis. – Moscow: MNVO «Spektr», 2013. 95 p.
 12. Samokrutov A. A., Sh evaldykin V. G., Bobrov V. T., Sergeev K.L., Alehin S.G. «Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel». Patent RF na izobretenie No2343475 Byul. izobr., 2009, No1.
 13. Samokrutov A.A., Bobrov V.T., Shevaldykin V.G., Sergeev K.L., Kozlov V.N., Alehin S.G. «Magnitnaya sistema elektromagnitno-akusticheskogo preobrazovatelya». Patent RF na izobretenie No2350943 Byul. izobr., 2009, No9.
 14. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel. Samokrutov A.A., Bobrov V.T., Shevaldykin V.G., Alehin S.G., Kozlov V.N. Patent na izobretenie RUS 2334981 20.02.2007.
 15. Alehin S.G., Samokrutov A.A., Bobrov V.T., Bobrov C.B., Sergeev K.JI. Modelirovanie magnitnyh sistem EMA-preobrazovatelej dlya vozbuzhdeniya ultrazvukovyh voln. Kontrol. Diagnostika – 2013 – No7 – P. 12– 18.
 16. Muravev V.V. K raschetu parametrov magnitnoj sistemy elektromagnitno- akusticheskogo preobrazovatelya / V.V. Muravev, V.A. Strizhak, E.N. Balobanov // Intellektualnye sistemy v proizvodstve. – 2011. – No 1. – P. 197–205.
 17. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel. Patent RF na poleznuyu model No134658 ot 31.05.2013. / V. V. Muravev, O.V. Muraveva, V.A. Strizhak, A.V. Pryahin, E.N. Balobanov; opubl. 20.11.2013, Byul. N 32.
 18. Elektromagnitno-akusticheskij preobrazovatel. Patent RF na poleznuyu model No127931 ot 23.11.2012. / V.V. Muravev, O.V. Muraveva, V.A. Strizhak, A.V. Pryahin, E.N. Balobanov, L.V. Volkova; opubl. 10.05.2013, Byul. N 13. – 6 s.
 19. Muraveva O. V. Optimizaciya sistem podmagnichivaniya prohodnyh elektromagnitno-akusticheskikh preobrazovatelej obemnyh voln dlya nerazrushayushego kontrolya prutkovogo prokata / O.V. Muraveva, V. V. Muravev, E. N. Kokorina, V. D. Sterhov, D. V. Malyutin // Datchiki i sistemy. 2013. – No2. – P. 2–9.
 20. Astaf'ev A.N., Nevolin O. V., Mamaj A. M., Mutyachenko O. V., Astaf'ev N. A., Nevolin V. O. Universalna pristavka dlya standartnih ultrazvukovyh defektoskopiv i tovshinimiriv // defektoskopiyi. 2006. – No7. – P. 73–82.
 21. Ohtsuka Y., Yoshimura T., Ueda Y. P2E-6 New Design of Electromagnetic Acoustic Transducer for Precise Determination of Defect. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. Pages: 1609 – 1612, DOI: 10.1109 / ULTSYM.2007.405.
 22. Suchkov G.M., Aleksyeyev E.A., Zaharenko V.V. Energo- i resursozberigayuchi priladi ta tehnologiyi nerujnivnogo kontrolyu // Tehnichna diagnostika i nerujnivnij kontrol. 2006. – No4. – P. 29–34.
 23. WilcoxPD; M. Lowe JS; Cawley P. The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. Year: 2005, Volume: 52, Issue: 12. IEEE Journals & Magazines. Pages: 2370 – 2383, DOI: 10.1109 / TUFFC.2005.1563281.
 24. Mishkin A.V. Vpliv konstruktivnih parametrov bagatoelementnih fazovanih peretvoryuvachiv na formuvannya akustichnih poliv: Avtoref. kand. dis. Izhevsk: IzhGTU, 2015. 22 p.
 25. Migachev S. A., Kurkin M. I., Smorodinskij Ya. G. Bezkontaktное возбуждение звука в металле видеоимпульсами электрического поля // Дефектоскопия. – 2016. – No. 11. – P. 48–53.

26. Gurevich, S.Yu., Petrov, Yu.V., Shusharin, AV, Golubev, EV. Analysis of ultrasonic waves excited in a metal plate by nanosecond laser pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. No45 (4), P. 247–251.
27. Migushenko R. P., Suchkov G. M., Radev H. K., Petrishev O. N., Desyatnichenko A. V. Elektromagnitno-akustichnij peretvoryuvach dlya ultrazvukovoyi tovshinometriyi feromagnetnih metalovirobiv bez vidalennya dielektrichnogo pokrittya // Tehnichna elektrodinamika. – 2016. – No2 – P. 78–82.
28. Plesnetsov S.Yu., Petrishchev ON, Mygushchenko RP, Suchkov GM, Sotnik SV, Kropachek O.Yu. Powerful sources of pulse high-frequency electromechanical transducers for measurement, testing and diagnostics // Elektrotehnika i elektromehanika. 2018. – No2. – P. 31–35.
29. Podolyan A. A. Formirovanie magnitnogo polya s zadannymi harakteristikami v EMA preobrazovatelyah sistem nerazrushayushogo kontrolya promyshlennogo oborudovaniya // Metody i pribory kontrolya kachestva. – 2006. – Vyp. 17. – P. 18–21.
31. Tymchik G. S. Formirovanie impulsov specialnoj formy dlya elektromagnitnyh akusticheskikh preobrazovatelej / G.S. Tymchik, A.A. Podolyan// Vestnik NTUU «KPI». Seriya «Priborostroenie». – 2013. – Vyp. 45. – P. 64–69.

Надійшла (received) 08.12.2019

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Салам Буссі (Салам Бусси, Salam Bussey) – аспірантка кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

Плеснецов Сергій Юрійович (Плеснецов Сергей Юрьевич, Plesnetsov Sergey Yurievich) – кандидат технічних наук, докторант каф. КРСКД НТУ «ХПІ»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>; e-mail: s.plesnetsov@gmail.com